苹果生产智能底盘与除草及收获装备技术研究进展

段罗佳[1,2,3,4]，杨福增[1,2,3*]，闫 彬[1,2,3]，史帅旗[1,2,3]，秦纪凤[1,2,3]

（1. 西北农林科技大学 机械与电子工程学院，陕西杨凌 712100；2. 农业农村部苹果全程机械化科研基地，陕西杨凌 712100；3. 农业农村部北方农业装备科学观测实验站，陕西杨凌 712100；4. 宁夏回族自治区农业机械化技术推广站，宁夏银川 750000）

摘 要：苹果产业作为苹果主产区经济发展的支柱产业，为当地果农增收、农业增效做出了重要贡献。随着产业的转型升级，苹果生产机械化和智能化的发展程度将影响其经济效益。为推进苹果生产智能化技术研究与智能装备研发，本文概述了苹果生产各个环节机械化水平，阐述了动力底盘、除草装备、收获装备等苹果生产装备主要技术特点，归纳了自动调平与控制、自主导航、自动避障、杂草识别、杂草去除、苹果识别、苹果定位、苹果分离等技术分别在智能化动力底盘、智能除草装备、苹果采收机器人上的研究与应用进展，并阐明了上述3种智能装备关键技术的基本原理和特点。在此基础上，指出了目前苹果生产智能装备技术面临的挑战，并提出了发展建议。

关键词：苹果产业；智能化；动力底盘；除草装备；苹果采收机器人

中图分类号：S22 **文献标志码：**A **文章编号：**SA202206010

引用格式：段罗佳, 杨福增, 闫彬, 史帅旗, 秦纪凤. 苹果生产智能底盘与除草及收获装备技术研究进展[J]. 智慧农业(中英文), 2022, 4(3): 24-41.

DUAN Luojia, YANG Fuzeng, YAN Bin, SHI shuaiqi, QIN jifeng. Research progress of apple production intelligent chassis and weeding and harvesting equipment technology[J]. Smart Agriculture, 2022, 4(3): 24-41. (in Chinese with English abstract)

1 引 言

苹果营养价值高，富含维生素、蛋白质、糖分和微量元素等，深受全球人民喜爱。苹果是仅次于柑橘、香蕉和葡萄的世界第四大水果作物[1]。根据联合国粮食及农业组织统计数据，2020年，世界苹果总产量8644.3万吨，占水果总产量的9.75%。作为世界最大的苹果消费和种植基地，中国苹果产量已经占据全球近一半的规模。2020年，中国苹果产量为4406.6万吨[2]。在苹果优势生产区域，苹果产业已成为当地农民增收致富的经济支柱。

苹果属于劳动密集型农产品，比粮食作物需要更多的工人完成种植、田间管理和收获等生产环节工作[3]。然而，随着农业主要劳动力逐渐向城市转移，农业生产劳动力资源日益紧张，劳动力成本也随之大幅上涨。在中国，人工成本占苹果生产总成本的68.12%[4]。劳动力成本的增加严重制约全球苹果产业的高质量发展。如何控制劳动力成本过快增长，已成为苹果产业急需解决的问题。

收稿日期：2022-06-21

基金项目：陕西省重大科技攻关计划（202d0zdzx03-04-01）

作者简介：段罗佳（1990—），男，博士研究生，工程师，研究方向为智能化农业机械装备技术。E-mail：duanluojia@126.com

*通信作者：杨福增（1966—），男，博士，教授，研究方向为智能化农业机械装备技术。E-mail：yangfzkm@nwafu.edu.cn

大规模机械化和智能化为苹果生产提供了一个解决劳动力短缺的方案，苹果生产机械越来越受到果农的青睐。苹果生产主要有14个环节，分别是苗木培育—土地耕整—挖坑栽种—开沟施肥—植保喷药—中耕除草—修剪—灌溉—疏花疏果—套袋取袋—收获运输—分级储藏—冬季修剪—残枝处理[5]。上述环节根据机械化使用程度可分为三类：第一类，土地耕整、植保喷药、中耕除草、灌溉、分级储藏等，机械化程度高；第二类，苗木培育、挖坑栽种、开沟施肥等，初步实现机械化，仍需进一步推广；第三类，疏花疏果、套袋取袋、收获运输、修剪等，以人工作业为主，机械化程度很低。总体来看，苹果整个生产管理环节，机械化程度不高，无法满足苹果果园规模化发展和生产高效化、管理精细化、生产多样化需求。

随着信息技术、控制理论、人工智能、传感技术等的发展，机器人代替人工成为了可能。为推进苹果生产智能装备的研发与技术研究，引导苹果产业高质量发展，促进苹果产业转型升级，本文首先介绍了苹果生产管理环节机械化现状，阐述分析适用于苹果生产动力底盘、除草装备、收获装备技术及应用研究进展，总结上述3种装备及相关智能化技术存在的问题，并针对面临的挑战提出发展对策和建议。

2 智能化动力底盘及其关键技术

2.1 动力底盘装备

动力底盘是苹果作业机械的重要基础，其可靠性、稳定性和安全性将直接影响整机的作业质量和效率[6]。

果园动力底盘根据种植模式和地域环境的不同，主要有两种类型[7]。一种适用于平原地区大规模种植果园，多以轮式底盘和大型综合性机具为主。例如New Holland公司T4系列、Claas公司的NEXOS系列、John Deere公司的5ML系列等，如图1（a）、图1（b）和图1（c）所示，文献［8］详细介绍了它们的主要参数及技术结构特点。另一种适用于丘陵山区，以履带式底盘为主，如图1（d）所示的意大利ANTONIO CARRARO SPA公司的MACH2R型履带拖拉机，具备扭腰功能，在狭小的空间内可进行转弯，还能实现正反双向驾驶。中国果园动力底盘研究相比于发达国家起步晚，受苹果园环境和地形复杂等条件限制，研究者主要针对动力底盘的通过性、适用性、稳定性等方面开展了一系列研究[9-11]，但仍处于样机和实验室开发测试阶段。



（a）New Holland T4系列果园拖拉机



（b）Class NEXOS系列果园拖拉机



（c）John Deer 5100ML型果园拖拉机



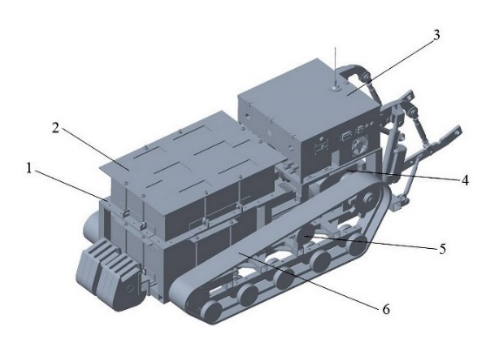
（d）Antonio MACH2R型扭腰履带拖拉机

图1 果园动力底盘类型

Fig. 1 Types of orchard power chassis

苹果生产新模式对环保、生态和节能提出了更高要求，迫切需要高效智能、绿色环保的动力底盘。电动底盘具有零排放、无污染、低噪声等优势，已成为果园绿色动力底盘的主攻方向。图2为一种电动履带动力底盘[12]，主要由车架、动力电池、减速机、驱动电机、控制系统和左右侧履带组成。该底盘行驶时，由左右两侧的电机驱动减速机带动履带底盘驱动轮运动；转向时，通过控制系统改变左右两侧履带的转动速度实现差速转向、单边转向和原地转向。现有果园电动底盘的研究集中在整机优化、控制技术、仿真试验3个方面。范思宇[13]设计了一种果园电动履

带运输机，通过减少车架横梁数量，优化纵梁结构完成了该运输机的轻量化改进。De Melo等[14]针对拖拉机滑移问题，提出了一种电动拖拉机自动滑转控制方法，并验证了防滑控制后有助于提高牵引效率。Xie等[15]提出了一种新型电动拖拉机驱动系统，建立了典型工况下驱动系统的切换规则，并进行了硬件在环（Hardware-in-the-Loop，HIL）实验，结果表明，该驱动系统可将耕作效率和旋耕效率分别提高11.35%和11.70%。未来仍需突破高效驱动与传动、动力输出、能量智能管理，以及作业机具、功能部件的协调控制等关键技术，提高果园电动底盘可靠性和适用性。



注：1. 车架；2. 动力电池组；3. 控制系统；4. 左右侧减速机；5. 左右侧驱动电机；6. 左右侧履带

图2　电动履带动力底盘

Fig. 2　Electric crawler power chassis

2.2 底盘智能化关键技术

现阶段，果园底盘智能化关键技术主要包括自动调平与控制、自动导航和作业信息远程监测等技术。本文主要介绍自动调平与控制和自动导航技术。

2.2.1　自动调平与控制技术

针对丘陵山区苹果园复杂地形地貌特征，当底盘与不平地面接触时，会产生一定的倾斜角度，可采用一定的控制策略和算法，通过悬架、液压缸等执行机构对底盘进行调平以适应作业地形。农机生产与制造知名企业像约翰迪尔、久保田等研发的联合收获机调平系统，通过控制供油回路的通断和调节单侧履带的高度获取车身调平[16,17]。西北农林科技大学创制了基于“双向差高”液压调平装置的丘陵山地动力底盘，提高了底盘横向稳定性[18]。王涛[19]运用PID（Proportion Integral Differential）算法实现了履带式底盘车身自动调平。Wang等[20]设计了一种能够适应山区复杂地形的小型遥控底盘，该底盘具有良好的转弯性能，最小转弯半径可达418 mm，直线行驶控制稳定，横摆率只有0.86%。齐文超[21]针对丘陵山地轮式拖拉机设计的姿态主动调整系统，采用双闭环模糊PID控制算法，动态响应性能较好，但该系统由液压马达驱动，拖拉机在起伏路以较快速度行驶时，会明显出现调平“延迟”现象。孙景彬等[22]为实现山地履带拖拉机全向调平，将平行四杆机构和双车架机构分别应用到车身的横向和纵向调平方案中，能够满足丘陵山区等高线作业需求。Li等[23]基于自适应滑模控制算法设计的拖拉机姿态控制系统，可实现车身和机具协同调平。

以果园底盘智能化控制技术为核心，突破机身姿态自适应调控，开发各子系统作业工况信息远程监测装置和机外感知传感器[24]，建立机内机外实时智能感知与智能调控决策系统，实现果园底盘安全、精准、高效、稳定行驶与作业是果园智能底盘未来的发展趋势。

2.2.2　自主导航技术

苹果园环境复杂多变、生产环节多、现有劳动力不足等问题严重制约苹果产业的发展，农业机械自动导航技术的出现为解决这一问题带来了曙光。

采用自主导航技术的动力底盘，外形尺寸小巧紧凑，能在传统乔化密植果园狭小作业空间行驶作业。因不需要驾驶人员驾乘动力底盘，可减少驾驶人员与树枝的刮碰，有效地保护驾驶人员的人身安全。自主导航技术以经典自动导航技术为基础框架，融合机器视觉、深度学习、物联网、传感器、云计算等技术[25]，可实现动力底盘沿着预先设定的或者自主识别的作业路线自动跟踪行走，提高果园机械作业质量和效率[26]。

根据传感器种类不同，目前主要导航方式有GPS（Global Positioning System）/BDS（BeiDou Navigation Satellite System）/GNSS（Global Navigation Satellite System）卫星导航、机器视觉导航、激光雷达（Light Detection and Ranging，LiDAR）导航以及多传感器融合导航[27]。上述4种不同类型的导航技术性能对比如表1所示。

表1 四种类型果园导航技术性能对比

Table 1 Comparison of navigation technology performance of four types of apple orchard

导航技术	优点	缺点
卫星导航[28]	1.应用范围广 2.定位精度高 3.全天候工作	1.易受果园郁闭环境影响，导致信号丢失 2.由于自身工作原理，有很多误差
机器视觉导航[28]	1.速度快 2.信息量大 3.功能多	1.受光照和阴影的影响，鲁棒性需提高 2.受地形等环境影响，存在图像模糊等现象
激光雷达导航[29]	1.抗干扰能力强 2.扫描速度快 3.定位精准	1.成本相对较高 2.低于农机的障碍物或作物难以识别
多传感融合器导航[25]	1.定位精度最高 2.实时性好 3.系统鲁棒性强	1.数据融合处理相对复杂 2.基础融合理论与算法仍需完善

受限于果园郁闭环境，卫星信号受到树冠干扰，基于GNSS定位的导航方式在果园应用时会出现信号中断的情况。而机器视觉导航技术会受光照、阴影和视角范围等因素影响，导致系统鲁棒性降低[25,30]。研究者基于激光雷达和多传感器融合导航系统的研究较多。刘星星等[31]利用最小二乘法拟合识别树行，融合支持向量机（Support Vector Machine，SVM）算法生成导航路线，在3种不同果园环境下进行了测试验证，横向偏差绝对平均值不超过17.8 mm。刘志杰等[32]提出了一种基于虚拟雷达模型的导航路径跟踪控制方法，具有更高的路径跟踪精度和行驶稳定性，满足果园实际作业需求。刘伟洪等[33]使用3D LiDAR实时采集果园信息，将随机采样一致性算法和最小二乘法拟合求出导航线，克服果园树冠茂密、树干被遮挡等复杂场景。Guevara等[34]将扫描匹配的估计信息与GNSS测量值进行融合，来克服与GNSS接收器的误差被传播到LiDAR读数上。Zhang等[35]利用虚拟阿克曼转向模型设计的导航控制系统可实现单缸柴油机履带车辆的稳定控制。以上研究为解决果园底盘导航定位和导航控制提供了一些有效方法。

随着果园动力底盘自主导航技术的推广，为提高导航精度和增强抗干扰能力，将卫星导航、视觉导航、激光雷达导航、惯性导航等技术融合集成在动力底盘上，使底盘逐步向辅助驾驶、无人驾驶再到最后的自主作业是今后智能底盘研究的重点内容与方向。

3 智能除草装备与技术

3.1 智能除草装备

杂草是影响苹果生长发育的主要因素之一[36]，因此，防除杂草是果园管理至关重要的环节。现阶段较为成熟的除草机械多为行间除草机，苹果株间除草因苹果树干的阻碍，相对更困难。带有避障功能的株间除草机成为了目前的研究重点。发达国家有关除草机械研究较早，从20世纪50年代[37]发展至今，产品种类丰富，农机农艺融合紧密，自动化、信息化和智能化程度高。

果园除草机根据其工作方式不同可分为牵引

式（含悬挂式）和自走式（乘坐式、手扶式）[38]。平原地区大行距果园有开阔的作业空间，可使用牵引式除草机，如图3（a）所示，功率大，作业高效。丘陵山区果园可采用小型自走式除草机，如图3（b）所示，轻便灵活、爬坡越障能力强，但作业幅宽较窄，效率相对较低。中国对除草机械研究起步晚，受限于种植模式多样，两种类型的除草机发展不平衡。现阶段丘陵山区苹果园多为乔砧适植型果园，适用于此类果园的除草机种类不多；而适合于矮砧密植型果园除草机类型较多，如图3（c）所示，但质量与可靠性仍需提高。近年来，果园生草覆盖技术在逐步推广，如何精准地除去破坏果园生态的杂草，保留所需的益草成为果园除草环节又一难题。随着物联网与人工智能等技术快速发展，智能除草机的出现为解决这一问题带来了曙光。



(a)意大利ARRIZZA公司OLIVER TOP牵引式除草机



(b)美国John Deer公司8800A小型自走式除草机



(c)中国中农博远9G系列矮砧密植果园割草机

图3　苹果果园除草机类型

Fig.3 Different types of weeding machine

3.2 智能除草关键技术

3.2.1　自动避障技术

除草机自动避障技术要求除草机在复杂的非结构化果园环境中避开障碍物且能进行安全可靠的除草作业。果园环境中的障碍物复杂多变，静态障碍物有树木、石头、电线杆等，动态障碍物有动物、人、作业农机等。目前果园常用的除草避障方法[39]主要有接触式避障和非接触避障。接触式避障的工作原理是通过加装在切割部件前的机械式触杆与障碍物接触，在接触压力作用下，触杆绕转轴旋转同时引起信号采集机构（位移传感器或压力传感器）发生变化，将此信号传递给控制系统，驱动液压执行机构做出收缩避让动作。当触杆与障碍物分开后，在复位弹簧的作用下恢复原位，完成避障除草作业。为提升接触式避障除草机除草效果，王永烁等[40]利用圆弧型触杆和液压系统的协同作用，建立了自动避障控制系统，通过ADAMS软件仿真得到最优工作参数并进行了田间试验验证，所设计的除草机平均杂草除净率为92.65%。徐丽明等[41]基于仿形原理和避障的工作要求设计了一种精准避障控制系统，利用Recurdyn软件仿真寻找最优参数，田间试验得到平均除草作业覆盖率为93.97%。其他研究者从优化避障系统[42]、切割系统[43]和控制系统[44]等方面进行了相关研究。

非接触避障是指利用超声雷达、激光雷达、红外传感器、导航定位技术、视觉传感器和多传感器融合技术检测障碍物，传递给控制系统，驱动相关执行元件避开障碍物。史璐等[45]融合了矢量场直方图算法和动态窗口算法用于激光雷达果园割草机避障，在前进总长100 m，并设置10个障碍物田间试验中，漏割率为4.8%、全程工作时间为30 s，满足丘陵山地果园的避障需求。Averill等[46]介绍了一种首批上市的除草机器人TERTILL®，该除草机器人以太阳能为动力源，

使用电容传感器成功避开障碍物。Reiser等[47]对比了接触式避障和非接触避障（超声波避障），在测试中发现超声波避障性能优于传统接触式避障，与自主导航技术结合，可以提高除草质量。张梦娇[48]采用双目相机视觉检测技术和优化后的人工势场算法实现果园割草机避障，但在强光照射的影响下存在障碍物误检的情况。冯吉[49]将激光雷达和双目视觉技术融合实现割草机前方障碍物检测，进一步提高了割草机前方障碍物的检测精度。

各传感器都有自己的优势与不足，为提高障碍物检测实时性、可靠性、精确性，将多传感器技术融合进行优势互补是避障技术发展趋势。多传感器融合后避障控制系统将会更加复杂，设计高精度、轻量化避障控制系统会是今后的研究热点。

3.2.2 杂草识别技术

果园生草技术是一种有效的土壤管理方式，可以改善果园内的生态环境，维持果园内的生态平衡，为果树高质高产提供保障[50]。果园生草需要对果园内的杂草进行合理的选留，及时拔除或刈割无用的杂草。机器替代人工靶向去除是未来发展方向，其中，快速、实时、精确识别果园内杂草、益草以及背景环境是技术难点。目前常用的杂草识别方法主要有视觉法和光谱法。Li等[51]利用高光谱成像和机器学习的方法识别狗尾草、针茅、毛茛等4种杂草，准确率为89.1%。Espejo-Garcia等[52]基于RGB深度相机和优化的迁移学习算法提出了一种杂草识别系统，可以在不降低性能的情况下避免过拟合，但该系统是在专用数据集进行训练的，若更换数据集，F_1分数可能会大幅降低。Raja等[53]提出了一种称为“作物信号”的新技术，首次利用荧光标记作物植株，以便除草机器人能够有效区分作物与杂草，达到精准除草的目的。赵辉等[54]改进了DenseNet模型用于杂草识别，性能优于VggNet-16、ResNet-50和未改进的DenseNet-121模型。徐艳蕾等[55]根据自然环境下杂草图像数据特征，基于Xception卷积网络构建了一种杂草识别模型，对自然条件下8类杂草的平均测试识别准确率高达98.63%。林芬芳等[56]应用偏振光谱技术成功识别玉米和5种杂草。李开敬等[57]、许燕等[58]优化Faster R-CNN（Region Convolution Neural Network）后可识别不同天气条件和复杂背景下不同种类的杂草。

图像处理是杂草识别的基础，与工业应用环境不同，果园除草装备通常在自然条件下工作，环境复杂多变，容易受到光照、阴雨天气、果园郁闭程度等影响，导致非结构环境下的杂草识别异常困难[59]。对于上述影响因素，可采取相应的解决措施来减少它们对杂草识别的干扰。Lottes和Stachniss[60]为去除自然光对甜菜除草机器人识别系统的影响，采用黑布遮挡和补光照明的方法，提高了目标检测效果。苗中华等[61]使用融合多图像处理算法的投票方法进行杂草检测，并验证了该算法在雨滴和强光等复杂农业场景下具有较好的适应性和鲁棒性。

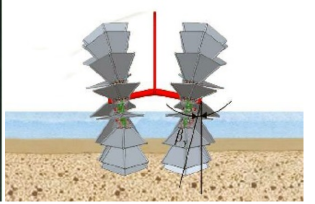
果园杂草识别的关键在于区分不同类型的杂草，而这些杂草往往具有相似的特征。实际应用中还有光照、杂草叶子的遮挡和堆叠等问题[62]，未来仍值得深入研究，为实现精准除草、生草覆盖、智能除草打下良好基础。

3.2.3 杂草去除技术

杂草识别之后，需要通过执行机构实现杂草去除。执行机构一般是由机械臂和末端执行器（除草刀）组成，大多数场景没有自由度的要求，机械臂可以省去，直接由除草刀执行割草任务。执行机构按照是否需要全部去除杂草的功能需求可以分为两种。一种是被动式除草机构，无需区分不同种类杂草，开展地毯式除草作业，常见的结构形式有圆盘甩刀式[63]、锄铲式[64]、圆刷式[65]、齿耙式[66]等，文献［67］介绍了它们的特点及缺点。近年来也有研究者将仿生学应用到除草末端执行器上，为除草末端执行器的设计提供了新的思路。王洪昌[68]研究了鼢鼠挖掘洞穴时的爪趾运动规律，基于鼢鼠最为粗壮的第3趾

轮廓设计了一种仿生除草铲（图4（a）），在土槽内进行触土试验，得出了该除草铲的牵引阻力在低速和较小入土角时小于圆弧形除草铲，适合应用于低速条件下的除草作业。闫东伟[69]通过研究鸭脚掌结构形状特点和水中游行运动特性，设计了一种适用于水田复杂环境下的仿生柔性行间除草装置（图4（b）），并进行田间试验验证了其良好的作业质量及适应性能，可为果园除草提供借鉴。





（a）鼢鼠爪仿生除草刀片　（b）稻鸭脚掌柔性仿生除草装置

图4　仿生除草装置

Fig. 4 Bionic weeding device

另外一种是主动式除草机构，需要识别部分杂草进行靶向去除，常采用电磁阀、继电器等元件控制除草动作。目前，主动式除草机构的研究主要集中在大田种植作物，用于除去行内杂草，保护作物。图5为株间除草原理示意图[70]，工作过程如下：当视觉系统检测到杂草在保护区以外时，通过控制系统命令两侧除草铲执行下降与闭合运动，此时杂草被夹持或切断，跟随移动平台向前运动，杂草发生移动，达到除草目的。在视觉系统检测到作物之前，除草铲将一直保持闭合状态，直到检测到作物时，将执行张开和上升恢复至初始位置动作，完成避苗并等待下一次除草指令。果园靶向除草时，可借鉴大田株内除草方法，把被保护的作物替换成需要保护的益草，同时还需要考虑果树树干的避障等问题，未来仍需要进行大量研究，实现智能化、精准化除草。

总体来说，除草装置的机械结构研发过于简单，研究人员主要精力都集中在杂草的精确识别和执行机构的运动稳定控制上，忽视了机械结构的研究，而除草装置的末端执行器直接作用于杂草，它的可靠性将直接影响除草质量与效率，后续应加强此方面的研究与应用。

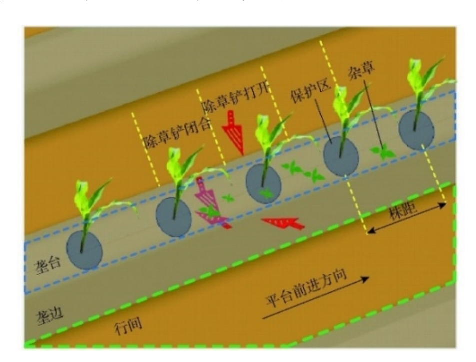


图5　株间除草原理图

Fig. 5 Schematic of inter-row weeding

4　智能收获装备及技术

4.1　智能收获装备

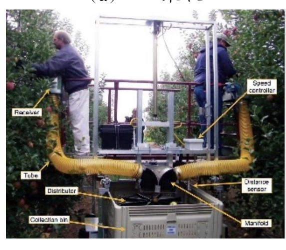
苹果收获是苹果生产中非常重要的环节，其作业效率和质量直接影响着苹果产业的经济效益。如图7所示，苹果收获主要有人工采收、机械采收、半自动化辅助采摘、机器人采收4种形式。机械采摘的主要方式是振摇式，即利用机械外力使树体或树枝发生振动或振摇，使果实产生加速度，在连结最弱处与果枝分离而掉落。半自动化辅助采摘是通过采摘辅助平台，同时实现多人手工采摘，经过传送机构后进入收集装置。机器人采收是一项系统工程，涉及传感、自动化、机械设计、机器视觉等多项技术。机器人采收过程中需要完成三项任务：苹果识别、定位、分离[71]。其中苹果识别和定位任务由机器视觉系统完成，分离则通过末端执行器实现。法国在1985年率先开启了苹果采收机器人的研究，开发了双机械臂采收机器人雏形[72,73]。经过多年发展，当前条件下的采收机器人可以实现采收作业，但由于受自然环境、种植模式等因素影响，各团队研发的采收机器人采收效果和效率各不相同[74]，采摘成功率集中在67%～90%，采摘速度为6～15.4 s。目前，鲜食苹果仍然以采摘平台配合人工采摘为主，因为机械采收苹果损伤率高，而机器人采收成本高、效率低，不同种植模式下果园适应性差，离商业化应用仍有较大差距。



(a)人工采收



(b)机械采收



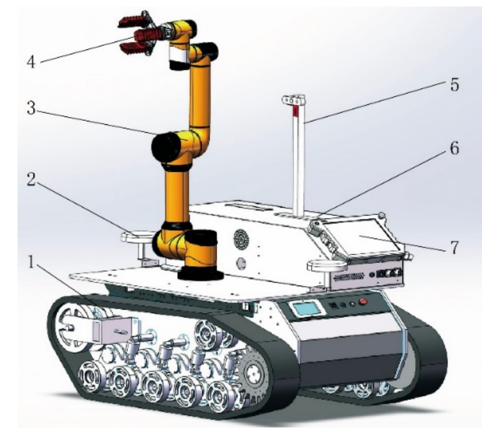
(c)半自动化辅助采收



(d)机器人采收

图6 苹果收获形式[75,76]

Fig.6 Types of apple harvest



注：1.智能履带底盘；2.导航系统；3.机械臂；4.末端执行器；5.深度相机；6.控制系统及电源箱；7.显控一体机

图7 苹果采收器人

Fig. 7 Apple harvesting robot

图7为西北农林科技大学杨福增团队创制的苹果采收机器人样机，包括行走系统、识别系统、执行系统和控制系统4个系统。行走系统包括履带/轮式底盘、导航系统（雷达/北斗终端）等，是苹果采收机器人的“双脚”，也是采收机器人搭建的基础平台；视觉系统是苹果采收机器人的“眼睛”，主要由视觉传感器/深度相机和上位机组成，可以实现识别与定位苹果果实功能；执行系统是苹果采收机器人的“双手”，包括机械臂和末端执行器，主要完成苹果采摘与收集等任务；控制系统是苹果采收机器人的“大脑”，控制系统的核心是上位机，它集成了控制界面和所有的软件模块来控制整个系统。苹果采收机器人采摘收获工作流程如下：视觉系统首先识别果实并确定果实位置，随后将目标位置传送至控制系统，控制系统进行合理路径规划并驱动执行系统到达果实位置，由末端执行器完成抓握、分离动作后，执行系统按照预先设定的采摘路径完成采摘并移动到苹果收集箱处，由末端执行器缓慢释放苹果，最后机器人复位开始下一轮采收。

4.2 智能采收关键技术

4.2.1 苹果识别技术

苹果识别是将苹果与具有树枝、树叶和其他重叠苹果的背景区分出来[77]。苹果识别的一般过程主要包括数据采集、图像分割、特征提取和目标识别四个步骤[78]。数据格式从早期的黑白图像发展到最近的高分辨率彩色图像，数据处理方法也从简单的算法（如线性判别分析和邻近算法），发展到更有效的算法，如SVM和CNN[79]。Yan等[80]利用深度学习中改进的YOLOv5算法模型可有效地识别未被遮挡或仅被遮挡且可抓取的苹果。李赫[81]、张世福[82]和田博凯[83]针对苹果机器人收获过程中自然环境、遮挡情况、复杂情况，通过改进的卷积神经网络、立体匹配等算法实现对苹果的轮廓、采摘点进行识别与定位。

随着机器学习在农业领域应用的迅速发展，研究人员开始针对苹果识别创新算法并进行验证。目前基于机器学习的苹果识别算法主要有支持向量机、神经网络、聚类算法和深度学习，它们各自的特点、不足如表2所示[84]。研究者针对这些不足，做出了一系列改进[85-87]。

近年来，研究者们致力于模型优化、提高检测或识别精度、加快识别速度、降低模型训练时间的研究。Gene-Mola等[88]运用Faster R- CNN模型对“富士”苹果进行识别测试，平均精准度达94.8%。夏雪等[89]通过改进轻量级的Mobile-NetV3网络，结合关键点预测的目标检测网络（CenterNet），构建了轻量级无锚点深度学习网络

模型（M-CenterNet），可实现苹果高检测精度的同时，减轻模型计算量。Wan 和 Goudos [90] 提出了一种改进的 Faster R-CNN 模型来识别青苹果，识别精度达到92%，但该模型仅适用于自然光照下和果实未被遮挡等情境。Kuznetsova 等 [91] 对传统 YOLOv3 深度卷积神经网络架构进行前后预处理，改进后的算法识别苹果时间仅为 19 ms，误识别率为 7.8%，未识别率为 9.2%。。Koirala 等 [92] 综述了用于苹果识别的多种深度学习算法，例如 YOLOV3、Faster R-CNN 和 VGG-16 等，识别准确率在 84%～95% 之间。Fan 等 [93] 发展了一种新的基于灰度中心 RGB 颜色空间的像素块分割算法（K-means 聚类算法的推广）用来识别苹果图像，对该分割算法进行了测试，平均准确度 > 95%，优于经典分割方法、传统聚类算法以及流行的深度学习分割算法。新兴的深度学习算法应用在苹果识别上的准确率大幅提高，这将为苹果采摘机器人后续定位与分离奠定基础。

大多数基于深度学习的苹果识别模型是由监督学习建立的，需要很多人工标记训练样本，当苹果样本中的品种特征（颜色和形状等）差异较大，样本需要重新标记，模型需要重新建立，这一过程耗时费力。因此，利用已标记的数据集自适应标记未标记的数据集 [94]，减少数据标记工作负荷，提高训练模型泛化能力逐渐成为一个热点话题。

表 2　四种类型的苹果识别机器学习算法比较

Table 2 Comparison of four types of apple recognition machine learning algorithms

机器学习算法	特点	不足
支持向量机	1. 是一种非参数方法，具有一定的灵活性 2. 可实现复杂功能，同时又能适应过度拟合	1. 针对大批量果树图像的学习策略难以实施 2. 解决青苹果、红苹果、树枝与树叶等多目标分类问题尚存在一定困难
神经网络	1. 可以维持非线性算法的高精度 2. 确保结果最佳逼近、全局最优、收敛速度快	1. 可能会出现过拟合、中心难定、学习率偏低 2. 网络运行效率和识别精度难以满足要求
聚类算法	1. 技术简单、聚类相似输出 2. 可被多层堆栈、效果直观	1. 没有进行全局优化 2. 某些情况下，随层数增加会失效，收益递减
深度学习	1. 可以自动提取参数。 2. 封闭静态环境，训练效果好，精度高。	1. 对于动态环境效果较差，训练效果不好 2. 需要大量数据进行训练，训练结果难以迁移

4.2.2　苹果定位技术

识别苹果后，其定位信息对于机器人是否能成功收获至关重要，因为它将引导末端执行器抓取和分离苹果。若信息不准确，会造成末端执行器在抓取和分离苹果时有困难。目前，主流的苹果目标定位方法有四种 [95]：（1）利用苹果质心定位；（2）利用苹果轮廓定位；（3）利用苹果对称轴定位；（4）利用三维坐标定位。Parrish 和 Goksel [96] 在 1977 年探索了苹果自动化采收可行性，首先，在黑白图像中识别了苹果，并得到它们的质心坐标。然后建立了一个数学变换模型，将质心坐标从二维图像映射到现实世界三维坐标系，用于引导末端执行器，这是苹果采摘机器人系统识别与定位的雏形。Feng 等 [97] 采用链码信息的苹果相邻分割方法，获得了每个苹果的质心坐标进行二维定位。一些研究者对苹果轮廓进行拟合，通过寻找苹果的中心和半径实现定位。Jiao 等 [98] 针对重叠苹果的检测与定位，提出了一种基于局部极大值的重叠圆定位方法，在苹果轮廓完整的情况下，能够准确、快速地定位苹果。江梅等 [99] 以 K-means 聚类算法为基础，结合凸壳原理提出了一种苹果识别算法，能够解决苹果在自然场景下受枝叶遮挡后的识别与定位问题。Li 等 [100] 将深度学习分割网络和锥体点云处理方法相结合，确定苹果半径和中心位置，并给末端执行器一个接近果实方向的矢量，提高采摘准确率。

采用机器视觉系统进行定位时需要获取苹果的深度信息，可以通过单目相机 [101]、双目相机 [81,102-104] 等获取图像间接计算得出，也可以利用激光扫描仪 [105] 或 3D 相机 [100,106] 等通过时间飞行法 TOF（Time of Flight）获得 [107]。视觉传感

器为机器人提供了丰富的环境信息，特别是RGBD（Red Green Blue Depth）相机因其低成本、轻量化、小型化等优点[108]，成为农业机器人必不可少的组成部分。从微软公司的Kinect演化到英特尔公司的Realense Deep，深度相机的更新为苹果在三维空间中的检测和定位提供了更多的方法[78]。图8为常用深度相机产品。苹果定位受果园环境影响较大，光照条件的不确定性、果实颜色与背景的相近、果实之间相互重叠遮挡等增加了识别与定位的难度。提升相关算法的精度、稳定性、实时性和普遍适应性仍是目前需要解决的问题。



(a)Microsoft公司的Kinect相机



(b)Intel公司的D455相机



(c)奥比中光公司的Astra相机



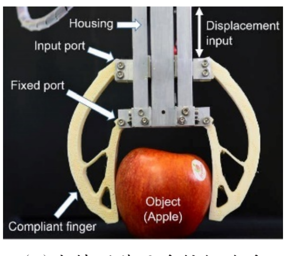
(d)图漾科技公司的FM851-E1相机

图8 常用深度相机

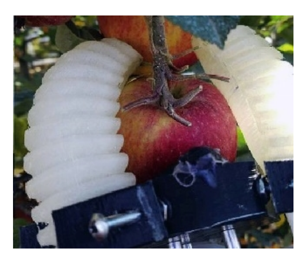
Fig. 8 Common used depth camera

4.2.3 苹果分离技术

在识别和定位树冠上的苹果后，这些信息将被用来引导机械手完成苹果的抓取与分离，因此机械手是完成苹果分离的重要载体，他的性能将直接影响苹果采收的成败。为满足实际应用要求，机械手设计应满足结构简单、稳定性高、抓取苹果时无损伤。根据机械手与作用对象接触方式不同，可将目前主流的苹果采摘机械手类型分为夹持型和包裹型[109]，其结构如图9所示。夹持型采摘手通常识别苹果果柄，夹持苹果后扭断果柄和枝条的连接，达到苹果与果树分离的目的。因其作业对象是果实枝条，容易被遮挡，准确地定位和识别相对困难，导致该方法环境实用性较差[110]。而包裹型采摘手作用对象是果实本身，为避免果实瘀伤，主要通过以下两种途径解决：一是采用精确的抓握力调节策略[111,112]，对采摘手与果实之间的接触力进行严格地控制；二是应用柔性材料[113-117]优化采摘手结构，采摘手发生变形实现与苹果表面包裹贴合。柔性机械手具有良好的适应性和柔顺性，但刚度不足。为此刘晓敏等[118]设计了一个“刚-柔耦合”结构的机械手，该机械手的气动软体驱动器内部有刚性骨架，可在保持一定刚度的情况下实现柔性采摘。快速的驱动和准确的抓握是提升采摘效率的关键，Park等[119]研制了一种兼具刚性和柔性特点的机械手，可同时提高驱动速度和指尖力。软体采摘手可以较为理想地满足苹果采摘需求，但考虑到它柔顺性过高，若遇到枝条等稠密障碍物时，容易发生弯曲变形从而导致采摘失败[112]。



(a)夹持型苹果采摘机械手



(b)包裹型苹果采摘机械手

图9 苹果采摘机械手类型[120,121]

Fig. 9 Types of apple picking manipulator

目前，软体机械手仍是机器人领域的研究热点。而建立软体手运动和动力学模型是其中一项复杂且重要的工作，由于受自身材料属性、连续变形、多自由度的影响，无法利用成熟的刚体模型进行求解[122]。软体机械手目前常用的建模方法可归纳为两类：常曲率法和非常曲率法[123]。文献［124-127］介绍了软体机械手的一些建模方法，例如有限元法、几何精确法和分段常曲率法等，建模时需要考虑软体手材料变形时的非线性力学特性[128]，且涉及多学科的融合交叉，其模型精度仍需进一步的提高。建模分析后需要一个鲁棒性好的控制系统来实现后续抓取分离，路径规划等一系列动作[129]。采摘手抓取苹果时，通过在指尖安装相应的传感器，获得实时的位

置、接触力、关节角度等信息，反馈给控制系统，结合自适应控制算法，完成适应苹果大小和形状的采摘动作。

5 苹果智能化生产面临的问题与发展建议

5.1 面临的问题

目前，苹果智能化生产装备及技术已取得一系列的研究成果，是推进苹果生产高质、高效发展的重要支撑，应用前景广阔。但因研发与技术条件等缺陷，果园智能化动力底盘、智能化除草装备及采收机器人3种关键装备在以下方面还面临着挑战。

（1）果园动力底盘的短板是在复杂地形下如何稳定作业。由于果园主要种植区域丘陵山地等复杂地形具有坡陡路窄、地块碎小、沟壑纵横、崎岖不平、土壤条件多样等特点，对动力底盘安全性、通过性、稳定性及等高线作业提出了更高要求，目前，已研发的样机可以进行部分环节作业，但其可靠性仍需进一步改善。果园动力底盘在复杂地形下实现安全精准自主导航是另一个难点，受不规则小地块、坡度作业及机身位姿变化、梯田台阶、悬崖等边缘区域的安全性、卫星信号不稳定等特有约束影响，智能化果园动力底盘遇到上述约束，会发生导航路线偏差大于设定范围、失灵等故障，影响其作业稳定性。

（2）智能化除草装备快速、准确地识别出不同种类杂草。当不同杂草特征（颜色、纹理、形状）区别明显时，很容易实现杂草目标检测；当不同杂草特征相近时，传统图像处理方法难以实现特征提取。果园环境复杂多变，受光照、气候、果园障碍物（树干、石头）遮挡等影响，在非标准化环境下获取信息异常困难。

（3）苹果采收机器人在果实识别与定位过程中，易受光照、天气、枝干树叶遮挡等干扰因素影响，造成无法准确、快速识别与定位，从而降低采摘成功率。采收机械手在高度非结构化与不确定的可变果园环境中，还存在果实采摘抓握稳定性、包裹性和普适性均较差的明显缺点。总体而言，苹果采摘机器人研究中存在的最大问题仍然是采摘效率较低。

5.2 发展建议

苹果智能化生产装备相比于工厂智能化设备作业环境呈现非结构化、复杂化，目前大多数处于实验室阶段，难以达到果园实际作业要求。为加快果园智能化动力底盘、智能化除草装备及采收机器人应用推广，提出以下发展建议。

（1）加强果园动力底盘基础理论研究。针对果园动力底盘服役环境复杂，开展土壤—机器耦合互作机理研究，以果园动力底盘坡地打滑工况为例，需要探究坡地作业时，底盘与坚实度小的土壤打滑互作机理；底盘打滑状态参数识别与防打滑控制策略等系统理论，提高动力底盘的爬坡性、稳定性、操纵性及牵引性能。突破非规则地块及复杂地形环境下的多模式精确自主导航技术，采用雷达/北斗/视觉/惯性测量单元等多传感融合技术解决环境感知问题，研究滑模抗干扰控制技术实现安全提醒及智能行驶，提高果园动力底盘智能化水平，以保证其作业的高质高效和安全可靠。

（2）要实现智能化除草机械快速、准确地识别杂草，采集数据时，采用遮光或补光的方法去除自然光的影响，同时利用数据增强方法扩增数据集，以此提高目标检测效果；研究适合苹果果园复杂场景下快速精准的识别算法，例如图神经网络（Graph Neural Networks，GNN）、改进视觉Transformer、注意力机制加强特征提取等；使用机器视觉与多传感器融合方法综合获取杂草信息、障碍物信息等多种信息，分析杂草生长趋势，安全可靠、快速精准地靶向除草。

（3）苹果采收机器人是未来解决鲜食苹果收获的重要支撑，应从三个方面进行技术改进：一是实现苹果果园逆境场景（果实被树叶/枝干遮挡、重叠遮挡、混合遮挡和顺光/逆光、晴天/阴

天等复杂光照环境）下的目标果实快速精确识别和定位；二是完善作业时所面临的果树枝干障碍、双/多臂作业区域动态采摘路径规划方法和控制策略，提高运行效率；三是优化机械手的材料和结构，研发结构简单、重量轻、成本低的灵巧采摘手，实现苹果无损伤采摘。软体机械手是一种比较理想的苹果采摘末端执行器，未来仍需在建立精确的运动和动力学模型、开发稳定的采摘控制系统和研究高效的采摘策略等方面进行研究。

参考文献：

[1] FORSLINE P L, ALDWINCKLE H S, DICKSON E E, et al. Collection, maintenance, characterization and utilization of wild apples of Central Asia[J]. Horticultural Reviews, 2003, 29: 1-61.

[2] 霍学喜, 刘天军, 刘军弟, 等. 2020年度中国苹果产业发展报告(精简版)[J]. 中国果菜, 2022, 42(2): 1-6.
HUO X, LIU T, LIU J, et al. 2020 China apple industry development report (simplified version)[J]. China Fruit & Vegetable, 2022, 42(2): 1-6.

[3] LABORDE D, MARTIN W, SWINNEN J, et al. COVID-19 risks to global food security[J]. Science, 2020, 369(6503): 500-502.

[4] 张旭青, 杜丽永, 朱启荣. 人工成本约束下苹果生产环节资本替代劳动的潜力研究[J]. 农业现代化研究, 2020, 41(3): 484-492.
ZHANG X, DU L, ZHU Q. The potential of substituting labors with capitals in apple production under the constraint of increasing labor cost[J]. Research of Agricultural Modernization, 2020, 41(3): 484-492.

[5] 王衡, 王军山. 烟台市苹果机械化发展现状及发展方向[J]. 山东农机化, 2021, (4): 31-32.

[6] 王韦韦, 陈黎卿, 杨洋, 等. 农业机械底盘技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 1-15.
WANG W, CHEN L, YANG Y, et al. Development and prospect of agricultural machinery chassis technology[J]. Transactions of the CSAM, 2021, 52 (8) : 1-15.

[7] 郑永军, 江世界, 陈炳太, 等. 丘陵山区果园机械化技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 1-20.
ZHENG Y, JIANG S, CHEN B, et al. Review on technology and equipment of mechanization in hilly orchard [J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(11): 1-20.

[8] 李晨硕, 邹娇蓉, 李继光. 国外专业型果园轮式拖拉机主要产品概述[J]. 拖拉机与农用运输车, 2021, 48 (4): 4-7.
LI C, ZOU J, LI J. Overview of main products of professional orchard wheeled tractor in foreign countries[J]. Tractor & Farm Transporter, 2021, 48 (4): 4-7.

[9] 郝朝会, 杨学军, 刘立晶, 等. 果园多功能动力底盘设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 66-73, 92.
HAO C, YANG X, LIU L, et al. Design and experiment of multifunctional dynamic chassis for orchard[J]. Transactions of the CSAM, 2018, 49 (12): 66-73, 92.

[10] 李昊伦. 基于PLC的小型履带式农用动力底盘控制系统设计[D]. 保定: 河北农业大学, 2021.
LI H. Design of small crawler type agricultural power chassis control system based on PLC[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2021.

[11] 王锋. 丘陵山地果园动力底盘的坡地通过性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
WANG F. Study on slope passability of the orchard power chassis in hilly area[D]. Chongqing: Southwest University, 2020.

[12] 郭惠萍, 王常林, 曹亚州, 等. 一种分布驱动式双电池组小型温室电动履带拖拉机: CN114408037A [P]. 2022-04-29.

[13] 范思宇. 果园电动履带底盘轻量化与动力学研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2017.
FAN S. Lightweight design and dynamics research of chassis frame for orchard electric tracked vehicle[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017.

[14] DE MELO R R, TOFOLI F L, DAHER S, et al. Wheel slip control applied to an electric tractor for improving tractive efficiency and reducing energy consumption[J]. Sensors, 2022, 4527: 1-22.

[15] XIE B, WANG S, WU X, et al. Design and hardware-in-the-loop test of a coupled drive system for electric tractor[J]. Biosystems Engineering, 2022, 216: 165-185.

[16] HOEHN-K W, TOMPSON-W L. Remotely adjustable disk leveling system: 4809786[P]. 1989-03-07.

[17] YUKIKAZU T. Posture controlling device for combine harvester: JP2013055897[P]. 2013-03-28.

[18] 张战文. 微型履带山地拖拉机稳定性能研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
ZHANG Z. Research on stability of micro-hillside caterpillar tractor[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011.

[19] 王涛. 山地拖拉机车身自动调平控制系统的设计与试验[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
WANG T. Design and test of the hillside tractor body automatic leveling control system[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014.

[20] WANG Y, YANG F, PAN G, et al. Design and testing of a small remote-control hillside tractor[J]. Transac-

tions of the ASABE, 2014, 57(2): 363-370.

[21] 齐文超. 丘山地拖拉机姿态主动调整系统研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
QI W. Research om active attitude adjustment system of tractors in hilly mountains[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.

[22] 孙景彬, 楚国评, 潘冠廷, 等. 遥控全向调平山地履带拖拉机设计与性能试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 358-369.
SUN J, CHU G, PAN G, et al. Design and performance test of remote control omnidirectional leveling hillside crawler tractor[J]. Transactions of the CSAM, 2021, 52(5): 358-369.

[23] LI Y, HUANG F, LIU C. Coordinated control of working implements-vehicle body for terrain adaptation of a robotized hilly tractor[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2022, 216: 165-185.

[24] 刘成良, 林洪振, 李彦明, 等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 1-18.
LIU C, LIN H, LI Y, et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(1): 1-18.

[25] 张漫, 季宇寒, 李世超, 等. 农业机械导航技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 1-18.
ZHANG M, JI Y, LI S, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(4): 1-18.

[26] 罗锡文, 廖娟, 邹湘军, 等. 信息技术提升农业机械化水平[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 1-14.
LUO X, LIAO J, ZOU X, et al. Enhancing agricultural mechanization level through information technology[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 1-14.

[27] 李会宾, 韩伟, 史云. 果园作业机器人的自主行间导航系统研究[J]. 中国农业信息, 2019, 31(4): 51-64.
LI H, HAN W, SHI Y. Autonomous inter-line navigation system for orchard robots[J]. China Agricultural Information, 2019, 31(4): 51-64.

[28] 胡静涛, 高雷, 白晓平, 等. 农业机械自动导航技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 1-10.
HU J, GAO L, BAI X, et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 1-10.

[29] 莫冬炎, 杨尘宇, 黄沛琛, 等. 基于环境感知的果园机器人自主导航技术研究进展[J]. 机电工程技术, 2021, 50(9): 145-150.
MO D, YANG C, HUANG P, et al. Research progress of autonomous navigation technology for orchard robots based on environment perception[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2021, 50(9): 145-150.

[30] 徐俊杰. 基于视觉的丘陵山区田间道路场景理解和障碍物检测研究[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
XU J. Research for field road scene recognition and obstacle detection in hilly areas based on vision[D]. Chongqing: Southwest University, 2019.

[31] 刘星星, 张超, 张浩, 等. 最小二乘法与SVM组合的林果行间自主导航方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 157-164.
LIU X, ZHANG C, ZHANG H, et al. Inter-row automatic navigation method by combining least square and SVM in forestry[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 157-164.

[32] 刘志杰, 王小乐, 任志刚, 等. 基于虚拟雷达模型的履带拖拉机导航路径跟踪控制算法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 376-385.
LIU Z, WANG X, REN Z, et al. Crawler tractor navigation path tracking control algorithm based on virtual radar model[J]. Transactions of the CSAM, 2021, 52(6): 376-385.

[33] 刘伟洪, 何雄奎, 刘亚佳, 等. 果园行间3D LiDAR导航方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 165-174.
LIU W, HE X, LIU Y, et al. Navigation method between rows for orchard based on 3D LiDAR[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 165-174.

[34] GUEVARA J, CHEEIN F A. A, GENE-MOLA J,et al. Analyzing and overcoming the effects of GNSS error on LiDAR based orchard parameters estimation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 170: 1-10.

[35] ZHANG L, ZHANG R, LI L, et al. Research on virtual Ackerman steering model based navigation system for tracked vehicles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 192: 1-13.

[36] 于威, 韩晓梅. 现代化果园机械除草装备与技术应用现状及发展趋向[J]. 现代农村科技, 2017, (6): 97.

[37] 李江国, 刘占良, 张晋国, 等. 国内外田间机械除草技术研究现状[J]. 农机化研究, 2006(10): 14-16.
LI J, LIU Z, ZHANG J, et al. Review of mechanical weeding technique in field at home and abroad [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006(10): 14-16.

[38] 杨天, 赵武云, 陈伯鸿, 等. 我国果园割草机发展现状与展望[J]. 农业工程, 2022, 12(1): 5-14.
YANG T, ZHAO W, CHEN B, et al. Development status and prospect of orchard lawn mower in China[J]. Agricultural Engineering, 2022, 12(1): 5-14.

[39] 杨硕, 李法德, 闫银发, 等. 果园株间机械除草技术研究进展与分析[J]. 农机化研究, 2020, 42(10): 1-8, 16.
YANG S, LI F, YAN Y, et al. Research progress and analysis of intra—Row mechanical weeding technology for orchards[J]. Journal of Agricultural Mechaniza-

tion Research, 2020, 42(10): 1-8, 16.

[40] 王永烁, 康建明, 彭强吉, 等. 果树株间避障除草机设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 20(2): 1-11.
WANG Y, KANG J, PENG Q, et al. Design and experiment of obstacle avoidance weeding machine for fruit trees[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 20(2): 1-11.

[41] 徐丽明, 赵诗建, 马帅, 等. 葡萄株间除草机精准避障控制系统优化设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(15): 31-39.
XU L, ZHAO S, MA S, et al. Optimized design and experiment of the precise obstacle avoidance control system for a grape interplant weeding machine[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(15): 31-39.

[42] 徐丽明, 于畅畅, 刘文, 等. 篱架式栽培葡萄株间除草机自动避障机构优化设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 23-30.
XU L, YU C, LIU W, et al. Optimal design on auto obstacle avoidance mechanism of intra-row weeder for trellis cultivated grape[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(7): 23-30.

[43] 李雪军, 毛雷, 杨欣, 等. 果园割草机垄面切割装置振动特性分析[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(11): 51-59.
LI X, MAO L, YANG X, et al. Analysis of vibration characteristics of ridge surface device of orchard mower[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(11): 51-59.

[44] 朱站伟, 汤智辉, 何义川, 等. 果园株间除草自动避障装置的设计与试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(6): 147-153.
ZHU Z, TANG Z, HE Y, et al. Design and experiment of automatic obstacle avoidance device for weeding between plants[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(6): 147-153.

[45] 史璐, 刘洪杰, 刘伟起, 等. 基于激光雷达的果园割草机避障方法研究[J]. 农机化研究, 2023, 45(2): 62-66.
SHI L, LIU H, LIU W, et al. Research on obstacle avoidance method of orchard mower based on LiDAR[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(2): 62-66.

[46] AVERILL K M, WESTBROOK A S, PINEDA-BERMUDEZ L, et al. Effects of Tertill® weeding robot on weed abundance and diversity[J]. Agronomy, 2022, 12 (8): 1754.

[47] REISER D, SEHSAH E, BUMANN O, et al. Development of an autonomous electric robot implement for intra-row weeding in vineyards[J]. Agriculture, 2019, 9 (18): 1-12.

[48] 张梦娇. 基于双目视觉技术的果园割草机避障系统设计[D]. 保定: 河北农业大学, 2019.
ZHANG M. Design of obstacle avoidance system of orchard lawn mower based on binocular vision technology[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2019.

[49] 冯吉. 基于机器视觉和激光雷达的割草机前方障碍物检测[D]. 保定: 河北农业大学, 2020.
FENG J. Obstacle detection in front of mower based on machine vision and LiDAR[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2020.

[50] 徐雄飞. 果园生草技术[J]. 安徽农学通报, 2022, 28 (3): 69-70, 78.
XU X. Grass-growing techniques in orchards[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2022, 28(3): 69-70, 78.

[51] LI Y, AL-SARAYREH M, IRIE K, et al. Identification of weeds based on hyperspectral imaging and machine learning[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 11(61): 1-13.

[52] ESPEJO-GARCIA B, MYLONAS N, ATHANASAKOS L, et al. Towards weeds identification assistance through transfer learning[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 171: 1-10.

[53] RAJA R, SLAUGHTER D C, FENNIMORE S A, et al. Crop signalling: A novel crop recognition technique for robotic weed control[J]. Biosystems Engineering, 2019, 187: 278-291.

[54] 赵辉, 曹宇航, 岳有军, 等. 基于改进DenseNet的田间杂草识别[J]. 农业工程学报, 2021, 37(18): 136-142.
ZHAO H, CAO Y, YUE Y, et al. Improved DenseNet-based weed identification in the field[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(18): 136-142.

[55] 徐艳蕾, 何润, 翟钰婷, 等. 基于轻量卷积网络的田间自然环境杂草识别方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(6): 2304-2312.
XU Y, HE R, ZHAI Y, et al. Weed identification method based on deep transfer learning in field natural environment[J]. Journal of Jilin University (Engineering), 2021, 51(6): 2304-2312.

[56] 林芬芳, 张东彦, 王秀, 等. 基于偏振光谱的叶片尺度下玉米与杂草识别研究(英文)[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 361-370.
LIN F, ZHANG D, WANG X, et al. Identification of corn and weeds on the leaf scale using polarization spectroscopy[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(12): 361-370.

[57] 李开敬, 许燕, 周建平, 等. 基于Faster R-CNN和数据增强的棉田苗期杂草识别方法[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2021, 38(4): 450-456.
LI K, XU Y, ZHOU J, et al. Cotton field seedling weed identification method based on Faster R-CNN and data enhancement[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition in Chinese and English), 2021, 38 (4): 450-456.

[58] 许燕, 温德圣, 周建平, 等. 基于Faster R-CNN的新疆棉花幼苗与杂草识别方法[J]. 排灌机械工程学报,

2021, 39(6): 602-607.
XU Y, WEN D, ZHOU J, et al. Identification method of cotton seedlings and weeds in Xinjiang based on Faster R-CNN[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(6): 602-607.

[59] 傅雷扬, 李绍稳, 张乐, 等. 田间除草机器人研究进展综述[J]. 机器人, 2021, 43(6): 751-768.
FU L, LI S, ZHANG L, et al. Research progress on field weeding robots: A review[J]. Robot, 2021, 43(6): 751-768.

[60] LOTTES P, STACHNISS C. Semi-supervised online visual crop and weed classification in precision farming exploiting plant arrangement[C]// 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(iros). Piscataway, New York, USA: IEEE, 2017: 5155-5161.

[61] 苗中华, 余孝有, 徐美红, 等. 基于图像处理多算法融合的杂草检测方法及试验[J]. 智慧农业(中英文), 2020, 2(4): 103-115.
MIAO Z, YU X, XU M, et al. Weed detection method and experiment based on multi-algorithm fusion for image processing[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(4): 103-115.

[62] WU Z, CHEN Y, ZHAO B, et al. Review of weed detection methods based on computer vision[J]. Sensors, 2021, 21(11): 1-23.

[63] 杨鹏程. 果园株间除草机械臂的设计与控制研究[D]. 南京: 江苏大学, 2021.
YANG P. Design and control of a robotic arm for inter-plant weeding in orchards[D]. Nanjing: Jiangsu University, 2021.

[64] O'DOGHERTY M J, GODWIN R J, DEDOUSIS A P, et al. A mathematical model of the kinematics of a rotating disc for inter- and intra-row hoeing[J]. Biosystems Engineering, 2007, 96(2): 169-179.

[65] MELANDER B. Optimization of the adjustment of a vertical axis rotary brush weeder for intra-row weed control in row crops[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 68: 39-50.

[66] DUERINCKX K, MOUAZEN A M, ANTHONIS J, et al. Effects of spring-tine settings and operational conditions on the mechanical performance of a weed harrow tine[J]. Biosystems Engineering, 2005, 91(1): 21-34.

[67] 邢钦淞, 丁素明, 薛新宇, 等. 智能田间除草机器人发展现状研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(8): 173-181.
XING Q, DING S, XUE X, et al. Research on development status of intelligent field weeding robot [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43 (8): 173-181.

[68] 王洪昌. 基于鼢鼠爪趾几何结构特征的苗间仿生除草铲设计[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
WANG H. Design of intra-row bionic weeding blade based on geometric characteristic of claws of myospalax[D]. Changchun: Jilin University, 2015.

[69] 闫东伟. 基于水射流的水田仿生中耕除草装置机理与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
YAN D. Mechanism and experimental study on bionic weeding device for paddy field based on water jet[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021.

[70] 权龙哲, 张景禹, 姜伟, 等. 基于玉米根系保护的株间除草机器人系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 115-123.
QUAN L, ZHANG J, JIANG W, et al. Development and experiment of intra-row weeding robot system based on protection of maize root system[J]. Transactions of the CSAM, 2021, 52(12): 115-123.

[71] SILWAL A, KARKEE M, ZHANG Q. A hierarchical approach to apple identification for robotic harvesting[J]. Transactions of the ASABE, 2016, 59(5): 1079-1086.

[72] D'ESNON A. G. Robotic harvesting of apples [C]// Agri-Mation 1 Conference and Exposition. Chicago, USA: ASAE, 1985: 210-214

[73] KONDO N, TING K C. Robotics for bioproduction systems[M]. Washington: American Society of Agricultural Engineers, 1998: 5-98.

[74] BU L, CHEN C, HUI G, et al. Technological development of robotic apple harvesters: A review[J]. INMATEH-Agricultural Engineering, 2020, 61(2): 151-164.

[75] PETERSON D L, WOLFORD S D. Fresh market quality tree fruit harvester part II: Apples[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2003, 19(5): 545-548.

[76] ZHANG Z, HEINEMANN P H, SCHUPP J R, et al. Design and field test of a low-cost apple harvest-assist unit[J]. Transactions of the ASABE, 2016, 59: 1149-1156.

[77] TIAN Y, YANG G, WANG Z, et al. Apple detection during different growth stages in orchards using the improved YOLO-V3 model[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 157: 417-426.

[78] ZHANG Z, IGATHINATHANE C, LI J, et al. Technology progress in mechanical harvest of fresh market apples[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 175: 1-13.

[79] LU Y, LU R. Detection of surface and subsurface defects of apples using structured- illumination reflectance imaging with machine learning algorithms[J]. Transactions of the ASABE, 2018, 61(6): 1831-1842.

[80] YAN B, FAN P, LEI X, et al. A real-time apple targets detection method for picking robot based on improved YOLOv5[J]. Remote Sensing, 2021, 13(1619): 1-23.

[81] 李赫. 基于深度学习的多目标识别和定位研究[D].

秦皇岛: 燕山大学, 2021.
LI H. Multi-target recognition and location based on deep learning[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021.
[82] 张世福. 基于深度学习的苹果目标识别与定位算法研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.
ZHANG S. Research on apple target recognition and location algorithm based on deep learning[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020.
[83] 田博凯. 基于深度学习的复杂环境下苹果检测分类与定位技术研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2020.
TIAN B. Research on apple detection classification and location technology in complex environment based on deep learning[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2020.
[84] 金保华, 殷长魁, 张卫正, 等. 基于机器视觉的苹果园果实识别研究综述[J]. 轻工学报, 2019, 34(2): 71-81.
JIN B, YIN C, ZHANG W, et al. Review on apple garden fruit recognition based on machine vision[J]. Journal of Light Industry, 2019, 34(2): 71-81.
[85] ZHANG X, HE L, ZHANG J, et al. Determination of key canopy parameters for mass mechanical apple harvesting using supervised machine learning and principal component analysis (PCA) [J]. Biosystems Engineering, 2020, 193: 247-263.
[86] DONG W, ROY P, ISLER V. Semantic mapping for orchard environments by merging two-sides reconstructions of tree rows[J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37: 97-121.
[87] LIN G, TANG Y, ZOU X, et al. Color-, depth-, and shape-based 3D fruit detection[J]. Precision Agriculture, 2020, 21: 1-17.
[88] GENÉ-MOLA J, VILAPLANA V, ROSELL-POLO J R, et al. Multi-modal deep learning for Fuji apple detection using RGB-D cameras and their radiometric capabilities[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 689-698.
[89] 夏雪, 孙琦鑫, 侍啸, 等. 基于轻量级无锚点深度卷积神经网络的树上苹果检测模型[J]. 智慧农业(中英文), 2020, 2(1): 99-110.
XIA X, SUN Q, SHI X, et al. Apple detection model based on lightweight anchor-free deep convolutional neural network[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(1): 99-110.
[90] WAN S, GOUDOS S. Faster R-CNN for multi-class fruit detection using a robotic vision system[J]. Computer Networks, 2020, 168: 1-6.
[91] KUZNETSOVA A, MALEVA T, SOLOVIEV V. Using YOLOv3 Algorithm with pre- and post-processing for apple detection in fruit-harvesting robot[J]. Agronomy, 2020, 10(7): ID 1016.
[92] KOIRALA A, WALSH K B, WANG Z, et al. Deep learning-Method overview and review of use for fruit detection and yield estimation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 219-234.
[93] FAN P, LANG G, YAN B, et al. A method of segmenting apples based on gray-centered RGB color space[J]. Remote Sensing, 2021, 13(1211): 1-17.
[94] ZHANG W, CHEN K, WANG J, et al. Easy domain adaptation method for filling the species gap in deep learning-based fruit detection[J]. Horticulture Research, 2021, 8(119): 1-13.
[95] 王丹丹, 宋怀波, 何东健. 苹果采摘机器人视觉系统研究进展[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 59-69.
WANG D, SONG H, HE D. Research advance on vision system of apple picking robot[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(10): 59-69.
[96] PARRISH E A, GOKSEL A KJR. Pictorial pattern recognition applied to fruit harvesting[J]. Transactions of the ASAE, 1977, 20(5): 822-827.
[97] FENG J, WANG S, LIU G, et al. A separating method of adjacent apples based on machine vision and chain code information[C]// International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture. Berlin, German: Heidelberg Springer, 2012: 258-267.
[98] JIAO Y, LUO R, LI Q, et al. Detection and localization of overlapped fruits application in an apple harvesting robot[J]. Electronics, 2020, 9(1023): 1-14.
[99] 江梅, 孙飒爽, 何东健, 等. 融合K-means聚类分割算法与凸壳原理的遮挡苹果目标识别与定位方法[J]. 智慧农业, 2019, 1(2): 45-54.
JIANG M, SUN S, HE D, et al. Recognition and localization method of occluded apples based on K-means cluster-ing segmentation algorithm and convex hull theory[J]. Smart Agriculture, 2019, 1(2): 45-54.
[100] LI T, FENG Q, QIU Q, et al. Occluded apple fruit detection and localization with a frustum-based point-cloud-processing approach for robotic harvesting[J]. Remote Sensing, 2022, 14(482): 1-18.
[101] BAETEN J, DONN'E K, BOEDRIJ S, et al. Autonomous fruit picking machine: A robotic apple harvester[J]. Springer Tracts in Advanced Robotics, 2008, 42: 531-539.
[102] JI W, MENG X, QIAN Z, et al. Branch localization method based on the skeleton feature extraction and stereo matching for apple harvesting robot[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2017, 14 (3): 1-9.
[103] HOHIMER C J. WANG H, BHUSAL S, et al. Design and field evaluation of a robot apple harvesting system with 3D printed soft-robotic end-effector[J]. Transactions of the ASABE, 2019, 62(2): 405-414.
[104] SI Y. Location of apples in trees using stereoscopic vision[J]. Computers and Electronics in Agriculture,

2015, 112: 68-74.

[105] JIMENEZ A R, CERES R, PONS J L. A survey of computer vision methods for locating fruit on trees[J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(6): 1911-1920.

[106] NGUYEN T T, VANDEVOORDE K, WOUTERS N, et al. Detection of red and bicoloured apples on tree with an RGB-D camera[J]. Biosystems Engineering, 2016, 146: 33-44.

[107] 卜令昕 . 结构化果园苹果收获机器人关键技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
BU L. Research on key technology of structured orchard apple harvesting robot[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.

[108] GONGAL A, AMATYA S, KARKEE M, et al. Sensors and systems for fruit detection and localization: A review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 39(3): 281-311.

[109] 吴剑桥, 范圣哲, 贡亮, 等 . 果蔬采摘机器手系统设计与控制技术研究现状和发展趋势[J]. 智慧农业(中英文), 2020, 2(4): 17-40.
WU J, FAN S, GONG L, et al. Research status and development direction of design and control technology of fruit and vegetable picking robot system[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(4): 17-40.

[110] BULANON D M, KATAOKA T. Fruit detection system and an end effector for robotic harvesting of Fuji apples[J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2010, 12(1): 203-210.

[111] 丁一, 姬伟, 许波, 等 . 苹果采摘机器人柔顺抓取的参数自整定阻抗控制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 257-266.
DING Y, JI W, XU B, et al. Parameter self-tuning impedance control for compliance grasp of apple harvesting robot[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35 (22): 257, 266.

[112] FAN P, YAN B, WANG M, et al. Three-finger grasp planning and experimental analysis of picking patterns for robotic apple harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 188: 1-11.

[113] ZHAO H, O'BRIEN K, LI S, et al. Optoelectronically innervated soft prosthetic hand via stretchable optical waveguides[J]. Science Robotics, 2016, 1(1): 1-10.

[114] YAP H K, NG H Y, YEOW C H. High-force soft printable pneumatics for soft robotic applications[J]. Soft Robotics, 2016, 3(3): 144-158.

[115] KHALED E, NIELS L, MICHAEL J. Bending angle prediction and control of soft pneumatic actuators with embedded flex sensors—A data-driven approach[J]. Mechatronics, 2018, 50: 234-247.

[116] GLICKP, SURESHS, RUFFATTOD, et al. A soft robotic gripper with gecko-inspired adhesive[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(2): 903-910.

[117] RUS D, TOLLEY M T. Design fabrication and control of soft robots[J]. Nature, 2015, 521: 467-475.

[118] 刘晓敏, 田德宝, 宋懋征, 等 . 气动球果采摘柔性手爪设计与实验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 30-43.
LIU X, TIAN D, SONG M, et al. Design and experiment on pneumatic flexible gripper for picking globose fruit[J]. Transactions of the CSAM, 2021, 52 (2): 30-43.

[119] PARK W, SEO S, BAE J. A hybrid gripper with soft material and rigid structures[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4: 65-72.

[120] LIUC H, CHIUC H, CHENT L, et al. A Soft robotic gripper module with 3d printed compliant fingers for grasping fruits[C]// The 2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (aim). Piscataway, New York, USA: IEEE, 2018: 736-741.

[121] HOHIMER C J, WANG H, BHUSAL S, et al. Design and field evaluation of a robotic apple harvesting system with a 3D-printed soft-robotic end-effector[J]. Transactions of the ASABE, 2018, 62(2): 405-414.

[122] 李铁风, 李国瑞, 梁艺鸣, 等 . 软体机器人结构机理与驱动材料研究综述[J]. 力学学报, 2016, 48(4): 756-766.
LI T, LI G, LIANG Y, et al. Review of materials and structures in soft robotics[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48 (4): 756-766.

[123] CHEN X, ZHANG X, HUANG Y, et al. A review of soft manipulator research applications and opportunities[J]. Journal of Field Robotics, 2022, 39(3): 281-311.

[124] GRAZIOSO S, GIRONIMO G D, SICILIANO B. A geometrically exact model for soft continuum robots: The finite element deformation space formulation[J]. Soft Robotics, 2019, 6(6): 790-811.

[125] RENDA F, GIORELLI M, CALISTI M, et al. Dynamic model of a multibending soft robot arm driven by cables[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014, 30(5): 1109-1122.

[126] CHEN X, ZHANG X, LIU H, et al. Design and development of a soft robotic manipulator[J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2020, 16: 309-321.

[127] WEBSTER R J, JONES B A. Design and kinematic modeling of constant curvature continuum robots: A review[J]. The International Journal of Robotics Research, 2010, 29(13): 1661-1683.

[128] NASELLI G A, MAZZOLAI Barbara. The softness distribution index: Towards the creation of guidelines for the modeling of soft-bodied robots[J]. The International Journal of Robotics Research, 2021, 40(1):

197-223.
[129] MURRAY R M, DENO D C, PISTER K S J, et al. Control primitives for robot systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1992, 22(1): 183-193.

Research Progress of Apple Production Intelligent Chassis and Weeding and Harvesting Equipment Technology

DUAN Luojia[1,2,3,4], YANG Fuzeng[1,2,3*], YAN Bin[1,2,3], SHI shuaiqi[1,2,3], QIN jifeng[1,2,3]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling* 712100, *China*; 2. *Apple Full Mechanized Scientific Research Base of Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Yangling* 712100, *China*; 3. *Northern Agricultural Equipment Scientific Observation and Experimental Station*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Yangling* 712100, *China*; 4. *Agricultural Mechanization Technology Extension Station of Ningxia Hui Autonomous Region*, *Yinchuan* 750000, *China*)

Abstract: As a pillar industry of economic development in the main apple-producing areas, apple industry has made important contributions to the increase of local farmers' income. With the transformation and upgrading of apple industry, the mechanization and intelligence level would be directly related to economic benefits. To promote the research of apple production intelligent technology and the development of intelligent equipment, in this paper, the current level of mechanization in each step of apple production was first introduced. Then, the main characteristics of the main apple orchard machinery, such as power chassis, weeding machinery, and harvesting equipment, were demonstrated. The application progress of automatic leveling and control, automatic navigation, automatic obstacle avoidance, weed identification, weed removal, apple identification, apple positioning, apple separation, and other technologies in intelligent power chassis, intelligent weeding machines, and apple harvesting robots, were summarized. The basic principles and characteristics of the above three key technologies of intelligent equipment were expounded in combination with different application environments. Intelligent control is the key technology for the intelligentization of orchard power chassis. The post of chassis adaptive control technology and autonomous navigation technology were discussed. In addition, a chassis intelligent perception and intelligent decision-making system should be established. Orchard chassis safe, accurate, efficient, and stable driving and operation is the future development trend of orchard intelligent chassis. The lack of robust weed sensing technology is the main limitation to the commercial development of a robotic weed control system. To improve the level of weed detection and weeding, machine vision and multi-sensor fusion methods have been proposed to solve the practical problems, such as illumination, overlapping leaves, occlusion, and classifier or network structure optimization. Robotic apple harvesting has proven to be a highly challenging task due to environmental complexities, sensor reliability, and robot stability. To improve the accuracy and efficiency of harvest mechanization applications in apples, apple quick identification under complex scenes, apple picking path planning, and materials and structure of manipulator for apple picking must all be optimized accordingly. Finally, the challenges of intelligent equipment technologies in apple production were analyzed, and the developing suggestions were put forward. This research can provide references and ideas for the advancement of intelligent technology research in apple production and the research and development of intelligent equipment.

Key words: apple industry; intelligence; power chassis; weeding equipment; apple harvesting robot